

探寻解决

酸性矿物污水

治理的方法



黄铁矿等含硫矿物的物理及化学风化造成的酸性矿物污水泄流 (acid mine drainage, 以下简称 AMD) 是对美国的环境构成最大威胁的污染源之一。然而, 这一问题并不只限于美国, 它是一个全球性问题。AMD 不仅影响采矿国, 还会殃及邻国的环境。根据美国环保局提供的资料, AMD 已对土壤和地表水源造成污染, 并导致溪流甚至整个河流系统不能供人类饮用, 且无法维持野生生物的生存需要。光是美国, 每年用于解决这一问题并控制其扩散的费用就达数十亿美元。

要解决 AMD 问题, 全世界科学家必须联合起来, 在可能发生酸性污水泄流的地点采集样本, 并检测其氧化程度。氧化是造成酸性污水泄流的第一步。最理想的是科学家们最好能够进行实地采样测试。现在, 由于有了一种由澳大利亚科学及工业研究院 (Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, 简称 CSIRO) 研制的新型探测仪器, 这一目标可望得到实现。

AMD 对土壤的污染及其危害

采矿过程中, 矿物从地底下被挖出来后, 矿物的颗粒度减小, 风化面增大。在美国东部, 含硫量极高的烟煤的开采是造成 AMD 的一个主要原因。而在美国西部, 则主要由于铜矿、金矿、银矿、铅矿、锌矿、及相关含硫矿物从硬岩层中开采出来造成的。修建高速公路时, 对路线所经过岩层的爆破所产生的岩石碎块也会产生 AMD。

降雨或河水溪流, 加上大气中的氧气以及暴露的矿物中的硫化物的共同作用, 可以生成硫酸。酸性氢离子会释放到从矿井及挖出的矿堆中流出来的水中。二价铁氧化产生三价铁离子的过程也可以产生氢离子。在低 pH 值(酸性)环境下, 硫化物氧化细菌“铁氧化硫杆菌” (*Thiobacillus ferrooxidans*) 会加速这一过程。然后, 三价铁离子在水中发生水解, 形成氢氧化铁 (三价), 向水中释放更多的氢离子, 进一步降低 pH 值, 除非岩石中含有足够的酸中和矿物来吸收所产生的酸。氢氧化铁(三价)从水中析出, 沉淀到河床上, 形成一层橘黄色淤泥, 几乎可以杀死所有在河底生长的水生生物。

不仅镉、铅、及砷等的重金属硫化物都能进行上述反应, 而且化学反应所产生的酸性溶液还会造成重金属从土壤中渗出, 进入河流。

美国蒙大拿州博兹曼市的马克西姆技术公司 (Maxim Technologies) 高级地球物理化学家, 前西北矿产协会环境问题委员会主席丽莎·柯克 (Lisa Kirk) 指出, 发生氧化反应并不一定意味着会产生酸。她说: “这很大程度上取决于矿渣中有没有石灰岩等中和性物质。必须对现场的情况进行综合考虑。”

如果发生 AMD, 其影响是多方面的, 如污染饮用水、干扰水生动植物的生长及繁殖、减少鲑鱼等珍贵鱼类的数量、以及影响户外运动及旅游业。

根据位于加拿大维多利亚的环境改良团体—英属哥伦比亚环保型采矿委

员会提供的数字，美国 18 万英亩水库总面积的 75% 以及 12, 000 英里以上的河流受到酸性矿物污水的污染。根据美国华盛顿特区一所非盈利机构，矿产政策中心 1993 年出版的《镀金的代价》(Burden of Gilt)，清理费用大约在 320 - 720 亿美元之间。该委员会一份在网上发表的报告《AMD：英属哥伦比亚的采矿及水污染问题》估计，加拿大仅 1998 年 1 年，采矿作业就产生了 3.51 亿公吨废岩石、5.1 亿公吨含硫尾矿（磨碎的采出岩石）以及 5, 500 万公吨其它可能会产生酸性矿物污水的采矿废料，如采矿时被清除的地表物质。该委员会还指出，仅加拿大含硫矿井比较集中的地区的清理工作就需要 20 - 50 亿加元。而光英属哥伦比亚一地，每年因采矿而增加的酸性及重金属污染的尾矿及废岩石就达 2, 500 万公吨。

防止酸性矿物污水产生的一个常用方法就是将酸性废岩石淹在水

下并隔绝空气，或将其埋在黏土等隔断层下，尽量保持干燥，使化学反应无法进行。但在任何由人与自然的互动系统中，绝对的隔离状况是难以实现的。泄流是不可避免的，关键问题是要有办法检测到泄流及由此造成的硫氧化物，并在其对环境造成污染之前就及时处理。

迄今为止，检查空气和/或水渗漏唯一的方法就是实地采集地下层气体样本。气体样本采集出来后，在地面用色层仪检测其含氧水平。如果样本中有氧气，则极有可能表明空气正通过隔断层渗入。但也有可能样本采集出地面后受到氧气污染。这就是为什么要采用原地采样分析方法的原因。

原地采样分析，避免误差

布拉德利 - 帕特森 (Bradley Patterson) 是澳大利亚科学与工业研究院 (CSIRO) 土地及水资源部的环

境化学家。他参与开发了一个可埋在矿物废料堆中的小型电化学探测器。该探测器通过一根细线朝地面发送信号。地面接收站接收信号后，或者当场进行分析，或者通过移动电话连接，进行异地分析。

帕特森说，我们的研究小组在治理污然场所研究方面十分活跃，特别在处理汽油等有机物造成污染方面。对此类有机化合物进行微生物清除，必须有氧气进入。我们设计这种探测器的初衷是为了能确定朝地下清理点输送的氧气的数量。将这种探测器用于检测密封矿物废料堆中的氧气含量对我们来说就相对容易多了。

根据帕特森的介绍，此项技术的一个主要优点就是可以实现原地检测，从而避免样品受到污染的可能。他说：“采用这种探测器后，就没有必要采集实物样本到地面。该探测器设计时就考虑到要价廉物美，要有几年的使用寿命，产生的数据应相对容易解释。”

这种探测器是采用强化的聚氯乙烯（一种不易受酸碱腐蚀的塑料）制成的，它可以测出空气及水中浓度仅为 0.2% 的氧气含量。该探测器长约 20 厘米，直径约 4 厘米，重 200 克，在干燥土壤中埋入深度为 50 - 100 米，在水饱和土壤中，埋入深度要浅一些。

帕特森说，此类探测器应和采矿行业常用来覆盖矿物废料的覆盖物配套使用。他说：“要防止酸性溶液的形成，必须阻止氧气的进入。这种探测器可以测出覆盖效果好不好。如果探测器测到氧气，那么就有问题，因为在 AMD 形成过程中，黄铁矿的氧化需要氧气。如果测到氧气，就表示进入的氧气要比消耗的氧气多。从而可以在形势失控之前解决问题。”该



对环境的污染：
含镉、铅、砷等重金属的酸性矿物污水会对河流造成有毒污染。

探测器的工作原理是气体通过一个缝筛向一个空腔内扩散，空腔内有一个半透膜。气体扩散通过半透膜，到达一个体积为 1.2mL 的空间，内装一个电化学传感器。该氧气传感器由一个铅-氧气电池构成，包括一个铅做成阳极和一个黄金做成的阴极。进入传感器的氧气由黄金电极转化成水，并产生一个与氧气浓度成正比的电流。测定该电流产生的电压后就可换算成氧气浓度。换算基准用探测器埋入地下之前测得的大气氧气浓度。

二十世纪九十年代 (1990s) 后期，澳大利亚科学与工业研究院 (CSIRO) 进行了一项实验。他们将数个探测器埋入一个富硫尾矿堆场中。堆场上面用干燥的沙子覆盖，下面用人工合成密封材料密封，以防止氧气接触矿物后形成硫酸盐。研究人员通过对比密封层上下测得的氧气浓度值就可以比较由大气进入的氧气量及特定埋藏深度的氧气消耗量。

经过六个月的监测，该研究小组发现干净沙子中的氧气浓度几乎接近大气中的氧气浓度。但经过一段时间后，密封层下面的探测器读数波动却很大。这显示，衬层没有密封好。研究人员朝废矿堆中抽水，进一步密封用于固定密封层的膨润土。然后继续监测。以后的监测结果表明，波动已经停止，氧气浓度降低到 0.5% 以下。这表明泄流已被封住 (正常大气中氧气浓度约为 21%)。

寻求更可靠的技术

此类探测器结构非常坚固，一般可用 2-5 年 (有的测试点的探测器埋入地下的时间已有 5 年，仍在发挥作用)。帕特森也承认连接线可能是

这一探测器的薄弱点。他说：“当然有可能受损，特别是应用于工矿场合时，如果应用大型推土设备，探测器埋入地下时就更要加以注意，必须用明显的标志标明探测器的埋入位置。”



电化学探测器：

一种新型矿物探测器可以测出氧气含量。氧气是形成酸性矿物污水的关键成份之一。这样，就可以及早采取预防措施。

那么，澳大利亚科学与工业研究院 (CSIRO) 研究小组有没有考虑过使用无线数据传输方式呢？帕特森承认尽管存在这种可能性，他们还没有加以考虑。采用这一方法会产生两个问题：一是要求的功率比目前探测器所能提供的要大。二是需要增加技术含量，造成成本大幅度提高。而这种探测器本身是作为一种低成本解决方案设计的。

帕特森说，他们目前正在考虑将这一产品商业化。但他拒绝透露探测器及相应监测设备的具体成本。

到目前为止，探测器还只在砂质及粘土环境中使用过。在岩石堆中还没有使用过。帕特森说：“如果要在岩石堆中使用 [岩石堆经过一段时间后会滑动]，可能必须将探测器装在砂床中，以避免探测器被挤坏，导线也必须装在隔离管中保护起来。”

英属哥伦比亚环保型采矿委员会开发部负责人丽莎-萨米 (Lisa Sumi) 认为这将是一项令人感兴趣的研究成果。当然其前提条件是要确保检测数据的可靠性。对矿物废料进行

监测所涉及的另一个问题是其成分庞杂 [指酸化反应的启动时间、碱性矿物的中和能力、以及其他因素都极难确定]。“我所关注的是，这是不是对矿物废料进行监测的唯一方法。”

柯克说：“氧气测量是跟踪含硫矿物废料的几种方法之一。我觉得氧气探测器与温度测量 [另一种评估氧化速度的好方法]、水质 [特别是 pH 值及硫酸盐含量] 结合起来使用效果可能会更好。尾矿本身是比较均一的，但这只是指其颗粒大小而言。随着在采矿作业过程中进入不同的岩层，尾矿含硫量和中和能力就会发生变化。因此，我们认为采用一种以上的监测方法有助于获得更全面的信息。”柯克补充说：“人们往往认为产生酸性污水是不可避免的。对此，我难以苟同。我认为象澳大利亚科学与工业研究院 (CSIRO) 及其它研究机构在废矿保存及监测技术方面取得的进步有极大的价值。”

—Lance Frazer

译自 *Environmental Health Perspectives* 109:
A486-A489 (2001)